

## ОПЫТ НАБЛЮДЕНИЙ С ЭЛЕКТРОННО-ОПТИЧЕСКИМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕМ УМ-92 НА БТА

*В. Л. Афанасьев, А. А. Пимонов*

Трехкаскадный ЭОП УМ-92 установлен на светосильном дифракционном спектрографе в первичном фокусе 6-м телескопа. В статье приведена схема установки, описана методика наблюдений слабых галактик и обработки результатов.

A three-stage UM-92 image-tube is mounted on the slit-spectrograph in the prime focus of the 6-meter telescope. The mounting scheme is given and the methods of observations of faint galaxies and processing of results are discussed.

Электронно-оптические преобразователи (ЭОП) в сочетании с фотоэмульсией являются весьма эффективными приемниками для спектральных исследований слабых объектов. Присущие фотографии недостатки — нелинейность и малый динамический диапазон — сужают круг решаемых наблюдательных задач. В спектральных исследованиях, не требующих высокого уровня обнаружения или точных фотометрических измерений, например в обзорных работах и исследованиях поля скоростей, успешно применяются многокаскадные ЭОП, имеющие высокую скорость получения информации.

Многокаскадные ЭОП в астрономии впервые были применены М. М. Бутсловым и др. [1]. Описанный в этой работе ЭОП явился прототипом выпускаемого серийно трехкаскадного электронно-оптического преобразователя УМ-92, который используется в отечественных обсерваториях для исследования галактик и переменных звезд [2, 3]. УМ-92, имеющий большое поле зрения и невысокое разрешение, удобен для спектральных наблюдений на крупных телескопах, в частности на БТА. Действительно, имея размер элемента разрешения 50—70 мкм, можно при умеренной светосиле камеры спектрографа (примерно 1 : 2) достичь разумного согласования размеров входной щели спектрографа и кружка рассеяния оптики телескопа.

В настоящей работе подытожен более чем двухлетний опыт наблюдений галактик с ЭОП УМ-92 на 6-м телескопе САО АН СССР.

**Спектрограф с ЭОП.** Нами используется светосильный дифракционный спектрограф UAGS фирмы Zeiss-Jena, установленный в первичном фокусе БТА. Электронно-оптический преобразователь с фокусирующей системой установлен на камере с внешним фокусом из комплекта спектрографа. Подробное описание камеры и спектрографа приведено в [4, 5]. Конструкция узла щели спектрографа изменена таким образом, что рабочая высота щели равна 17 мм (2 минуты дуги). Масштаб на спектрограмме перпендикулярно к дисперсии 17.5 с дуги/мм.

В качестве источника спектра сравнения используется газоразрядная лампа типа СГЗС с наполнением аргон—неон—гелий.

Магнитная фокусирующая система ЭОП состоит из трех линз с броневыми сердечниками, диапазон электронных увеличений от 0.5 до 2. Фото-

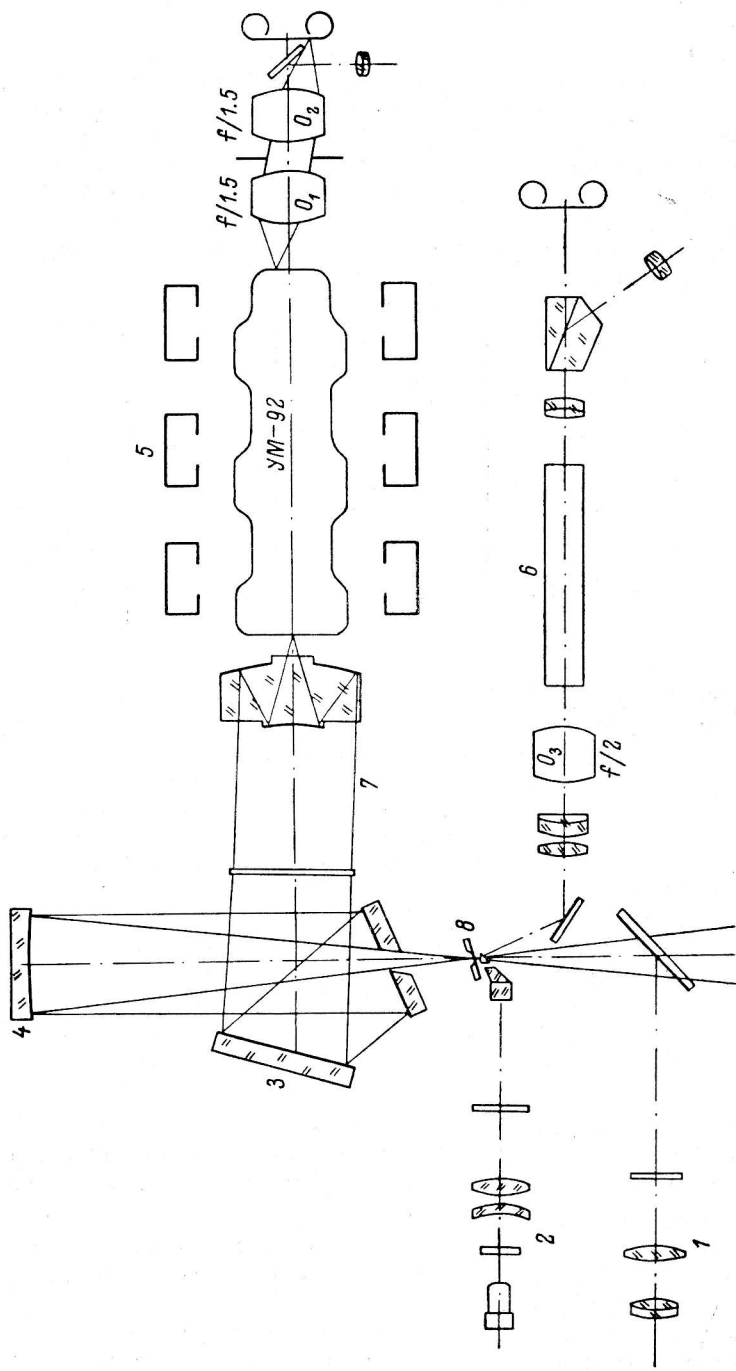


Рис. 1. Схема установки электронно-оптического преобразователя на спектрографе.

1 — полевого подомтр; 2 — осветитель спектра сравнения; 3 — дифракционная решетка; 4 — коллимагор,  $f/1.5$ ; 5 — магнитная фокусирующая система; 6 — ЭОП подомтра щели; 7 — камера с внешним фокусом  $f/1.5$ ; 8 — щель.

катод используемого нами экземпляра УМ-92 мультищелочной, выходной экран — желто-зеленого свечения. Изображение спектра с выходного экрана фотографируется на пленку типов А-600 или А-600Н при помощи оптики переброса (два фотографических объектива «Юпитер-3») с эффективностью 2—3%. Более подробные данные об ЭОП типа УМ-92 можно найти в [6].

Схема установки УМ-92 на спектрографе приведена на рис. 1. Для увеличения проникающей способности визуальный подсмотр щели снабжен трехкаскадным усилителем яркости с электростатической фокусировкой. При этом проникающая способность увеличивается на 2—3 звездные величины по сравнению с визуальной, и имеется возможность фотографирования объекта во время экспозиции, что важно для локализации положения щели на объекте.

Данные о применяемых нами дифракционных решетках и реализуемых при этом дисперсиях приведены в таблице.

Дифракционная решетка, штр./мм	Угол блеска	Порядок	Длина волны максимальной концентрации, Å	Дисперсия, Å/мм	Спектральный диапазон, Å
325	4	I	4400	180	3700—7000
650	8	I	4400	90	3700—7000
650	10	I	5200	90	3800—7500
650	26	I	12000	90	7500—85000
650	26	II	6500	46	4500—7000
650	26	III	4400	35	3700—5000
1300	17	I	4400	46	3700—6500

**Спектральный диапазон.** Регистрируемый ЭОП спектральный диапазон определяется выбранной дисперсией, чувствительностью фотокатода, концентрацией решетки, виньетированием камеры спектрографа и оптики переброса. Практически размер поля зрения без заметного падения эффективной спектральной чувствительности около 20 мм. На рис. 2 приведена кривая эф-

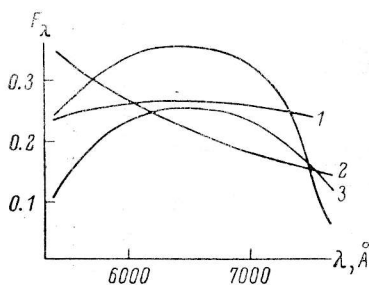


Рис. 2. Кривая эффективной спектральной чувствительности (в произвольных единицах) в красной области спектра. Дисперсия 90 Å/мм. 1 — виньетирование камеры спектрографа; 2 — кривая концентрации решетки (600 штр./мм, 8°); 3 — виньетирование оптики переброса.

фективной спектральной чувствительности в красной области спектра для дисперсии 90 Å/мм. В нашем случае размер поля зрения ограничивается в основном виньетированием оптики переброса. В ультрафиолетовой области спектра ( $\lambda < 3800$  Å) имеется резкий спад чувствительности, обусловленный плохой прозрачностью входного окна ЭОП. Для перекрытия видимой области спектра в нашем случае обычно требуется получение 2—3 спектрограмм.

**Число передаваемых элементов в спектре.** При данном поле зрения число передаваемых элементов в спектре на некотором уровне контраста зависит от разрешающей способности системы в целом, определяемой частотно-контрастными характеристиками (ЧКХ) ЭОП, оптики и фотоэмульсии. Данные о ЧКХ УМ-92 и применяемых объективах приведены в [7, 8]. Используемая нами фотоэмульсия типа А-600Н имеет высокую разрешающую способность (120—150 п.л./мм) и высокий контраст

(2.5—3.0), что практически не ухудшает результирующую контрастную чувствительность.

При коротких экспозициях разрешающая способность, определяемая по мере ГОИ и спектру сравнения, составляет около 20—25 п.л./мм при контрасте 5—10%. При длительных экспозициях на реальную разрешающую способность в спектре оказывают влияние нестабильности источников питания ЭОП и фокусирующей системы, гнутия монтировки ЭОП и спектрографа, магнитное поле Земли.

Нестабильности источников питания влияют в основном на изменения фокусных расстояний магнитных линз, что приводит к масштабным искажениям, смещающим линии спектра. Величина смещения увеличивается к краю поля зрения. Зависимость масштабных искажений от нестабильностей источников питания обсуждается в [10]. В нашем случае стабильность источников питания порядка  $10^{-4}$  и смещение линий в спектре при длительной экспозиции не превышает 0.02 мм.

Смещение спектральных линий, обусловленное магнитным полем Земли, исследовалось при различных зенитных расстояниях и азимутах БТА. Максимальное смещение составляет 0.02—0.03 мм при положении монтировки ЭОП перпендикулярно и вдоль направления поля Земли. Практически при экспозициях 30—40 мин ориентация ЭОП меняется мало, и смещением линий в магнитном поле Земли можно пренебречь. Гнутия монтировки существенны при длительных экспозициях, при сильном изменении зенитного расстояния и при наблюдениях в различных позиционных углах. В реальном случае величина гнутий не превышает 0.01 мм. На лучших спектрограммах при нормальной щели спектрографа (0.10—0.12 мм) и электронном увеличении ЭОП около единицы в спектре ночного неба, снятого с экспозицией 20—30 мин на дисперсии 90 Å/мм, разрешается *D*-линия натрия с контрастом 20—30%. Эта величина согласуется с расчетными данными для применяемого ЭОП, оптики и фотоэмульсии. Следует отметить, что разрешающая способность в синей области спектра несколько ниже, чем в красной, что обусловлено особенностями камеры с внешним фокусом [5].

Таким образом, реальное число передаваемых в спектре элементов в нашем случае составляет 300—400 на уровне 20—30%.

**Фотометрическая однородность.** Применение многокаскадного ЭОП, как известно [9], повышает чувствительность по сравнению с фотоэмульсией в  $10^3$ — $10^4$  раз на элементе разрешения. При этом из-за низкого коэффициента передачи контраста, темновых шумов и неоднородностей экрана ЭОП уровень обнаружения в спектрограмме падает. Предельно обнаруживаемая деталь в спектре будет определяться эффективным квантовым выходом [11] системы ЭОП+фотоэмульсия.

Эффективный квантовый выход УМ-92 на низких пространственных частотах (0.2—0.3 мм) при большом усилении может приближаться к квантовому выходу фотокатода. Но из-за ограниченного динамического диапазона фотоэмульсии при работе в таком режиме за время экспозиции нельзя накопить достаточное число фотонов для получения хорошей фотометрической однородности. При большом усилении (высоких ускоряющих напряжениях на ЭОП) растут темновые шумы и дисперсия коэффициента усиления [12]. Оптимальным является усиление, при котором реализуется выигрыш в чувствительности 100—500. Важно также относительное усиление разных камер ЭОП, влияющее на его шумовые характеристики.

Практически для рабочего экземпляра УМ-92 режим усиления разных камер подбирался экспериментально при экспонировании спектра ночного неба с экспозицией 30 мин. Режим, при котором обнаруживались слабейшие линии в спектре при малых шумах, считался оптимальным. Эффективный квантовый выход ЭОП в оптимальном режиме оценивался

по измерениям звезд на прямых снимках, сделанных с ЭОП. В нашем случае он около 0.2.

Наличие темновых шумов ЭОП при длительных экспозициях ухудшает отношение сигнал/шум, а многоэлектронная компонента шума приводит к появлению на спектрограммах точек, загрязняющих спектр. Шумы, регистрируемые на спектрограмме, ограничивают также максимальное время экспозиции. Величина шумов ЭОП оценивалась по методике, описанной в [13]. При температуре фотокатода меньше  $10^\circ\text{C}$  темновые шумы нашего экземпляра ЭОП такие: одноэлектронная компонента шума 300—500 событий ( $\text{см}^2\cdot\text{с}$ ), многоэлектронная — 1—2 события/ $(\text{см}^2\cdot\text{мин})$ . Уровень шумов, обусловленный одноэлектронной компонентой, в 2—3 раза меньше потока от непрерывного спектра ночного неба на дисперсии  $90\text{ \AA}/\text{мм}$ .

В оптимальном режиме фотометрическая однородность на реальных спектрограммах составляет в случае ниточных спектров 20—30% на масштабах 0.06—0.1 мм. Уширение спектрограмм при помощи расширителя UAGS при наблюдениях слабых объектов не приводит к желаемому результату, так как при этом из-за конструкции расширителя ухудшается отношение сигнал/шум спектра объекта над небом. Для ярких объектов (13—14 зв. величины) при максимально возможном уширении (1.5 мм на спектрограмме) реальная фотометрическая однородность равна 4—6% на масштабах порядка 0.1 мм. Дальнейшее увеличение фотометрической однородности в нашем случае возможно при применении маски и расширителя, описанного в [14].

**Спектр ночного неба.** При наблюдениях слабых объектов с УМ-92 при экспозициях более 10 мин на спектрограммах регистрируется фон неба. Наличие сильных линий в спектре неба приводит к необходимости вычитания фона при спектрофотометрической обработке и может приводить к заметным ошибкам измерений лучевых скоростей [15]. Характерные при наблюдениях вблизи крупных городов линии ртути, аргона и пр. [16] в спектре неба в нашем случае практически отсутствуют. Слабые линии ртути иногда наблюдаются при наличии легкого тумана или дымки. Таким образом, в спектре ночного неба в диапазоне  $3500\text{—}5500\text{ \AA}$ , наблюдаемого на БТА, яркие линии отсутствуют. При длительных выдержках, 30—40 мин, в безлунную ночь в этом диапазоне наблюдаются полосы Герцберга молекулы  $\text{O}_2$ , имеющие на спектрограммах контраст около 30%. Они затрудняют отождествление линий при наблюдениях галактик слабее 19 зв. величины. При слабой подсветке (луна) в ультрафиолетовой области спектра неба появляются линии *H* и *K* кальция, искажающие измерения объектов с небольшим красным смещением.

При поисковых наблюдениях галактик или исследовании поля скоростей наибольший интерес представляет красная область спектра. Кроме характерных для этого диапазона ярчайших линий в спектре ночного неба ([OI] 5577, NaI 5900, [OI] 6300/64  $\text{\AA}$ ) наиболее неприятны линии гидроксидов OH. Интенсивность их зависит, как известно, от зенитного расстояния и состояния атмосферы. На рис. 3 приведена спектрограмма участка спектра ночного неба, снятого на БТА с УМ-92 с дисперсией  $46\text{ \AA}/\text{мм}$  в диапазоне  $6200\text{—}7200\text{ \AA}$ . Линии в спектре отмечены согласно [17, 18]. Для близких объектов наибольшей помехой являются системы полос гидроксидов OH (6.1) и OH (7.2). При невысоких дисперсиях полосы в области  $6500\text{—}6700\text{ \AA}$  могут сливаться и блендироваться со спектром объекта, что необходимо учитывать. Техника вычитания фона неба на наших спектрограммах описана в [19].

**Наблюдения и обработка.** При наблюдениях объектов малых угловых размеров или звездообразных объект устанавливается в центре щели (на оси спектрографа). Положение объекта контролируется с помощью иглы, помещенной перед щелью. Гидрирование осуществляется тонкой коррек-

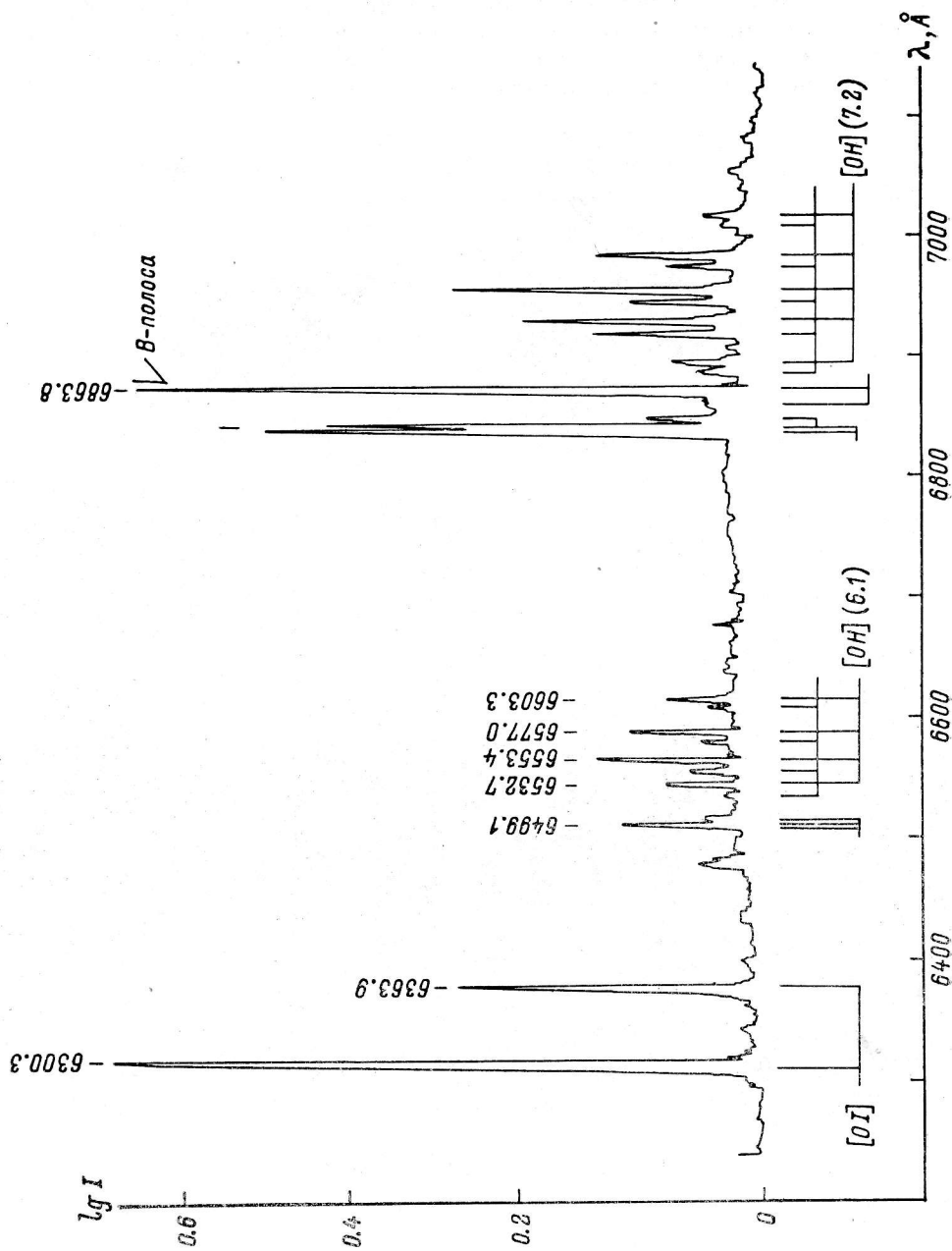


Рис. 3. Регистра-  
грамма спектра ноч-  
ного неба. Дисперсия  
46  $\text{\AA}/\text{мм}$ . Спектр по-  
лучен со щелью  
0.15 мм, экспози-  
ция 20 мин.

цией телескопа, без компенсации вращения поля. При наблюдениях протяженных объектов спектрограф позиционируется необходимым образом. Истинный позиционный угол с точностью до константы равен сумме трех углов: параллактического угла, вычисляемого в управляющей ЭВМ БТА, угла поворота стола, компенсирующего вращения поля, и угла поворота

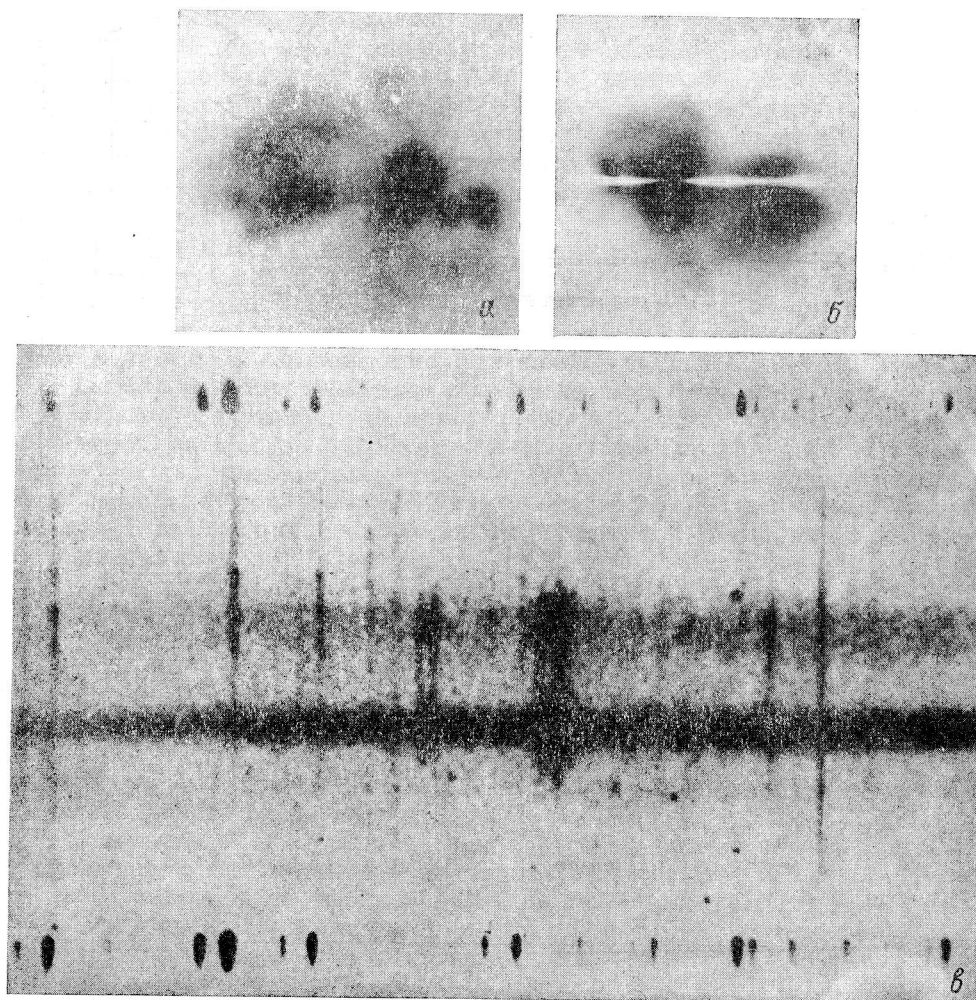


Рис. 4. Галактика Маркарян 171.

*a* — прямой снимок галактики в прямом фокусе БТА, экспозиция 20 мин; *б* — снимок с экрана ЭОП подсмотра щели, экспозиция 1 мин; *в* — спектрограмма объекта в красной области спектра, дисперсия 90 Å/мм, экспозиция 10 мин, щель 0.10 мм.

спектрографа на столе. Последние два угла отсчитываются наблюдателем в первичном фокусе. При необходимости точной локализации положения объекта на щели производится фотографирование объекта с экрана ЭОП подсмотра щели спектрографа. Пример такого снимка и соответствующая спектрограмма показаны на рис. 4. Там же помещен прямой снимок объекта, полученный в первичном фокусе БТА на эмульсии ПаО. Масштаб снимков, получаемых через ЭОП на щели спектрографа, около 3 с дуги/мм, время получения фона неба 3—4 мин.

При определении лучевых скоростей объектов в обзорных и поисковых программах измерения спектрограмм проводятся на компараторе ИЗА-2 или измерительном микроскопе Мир-2. При этом учитываются искажения

только по одной координате. Как правило, измеряются четыре линии спектра сравнения, и положение линий в объекте вычисляется по формулам четырехточечной интерполяции. Возможные смещения линий за счет гнутости или магнитного поля Земли контролируются по измерениям линий ночного неба. Для оценки реальной точности измерений проведено сравнение лучевых скоростей двойных галактик, определенных на БТА [23], с данными других авторов (рис. 5). Сравнивались измерения объектов с эмиссионными линиями в красной области спектра. При этом получается точность 60—70 км/с для дисперсии 90 Å/мм. Точность определения лучевых скоростей по измерениям линий поглощения в 1.5—2 раза хуже, что связано с большой ошибкой наведения.

При измерениях поля скоростей на наших спектрограммах следует учитывать масштабные искажения, обусловленные большой анизотроп-

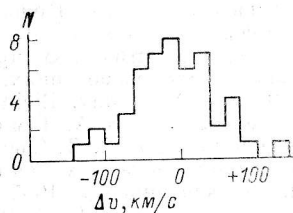


Рис. 5. Распределение ошибок определения лучевой скорости двойных галактик.

ной дисторсией ЭОП УМ-92. Величина искажений может достигать 20—30% на краю поля зрения. Измерения спектрограмм проводятся на координатно-измерительном приборе АСКОРЕКОРД. Редукция измеряется на ЭВМ по методике, предложенной в [13]. Точность редукций контролируется по измерениям линий ночного неба. Получаемая при такой обработке точность определения лучевых скоростей достигает 20—30 км/с.

При спектрофотометрических наблюдениях объектов в ночь наблюдений снимаются спектры звезд с известным распределением энергии в спектре для учета спектральной чувствительности ЭОП. При установке звезды и объекта в одно и то же место щели учитывается также неоднородность чувствительности фотокатода и выходного экрана ЭОП. Измерения спектрограмм проводятся на микрофотометре с цифровым выходом и обрабатываются по программам, описанным в [19, 24]. При обработке производится перевод почернений в интенсивности, вычитание фона неба, учитывается эффективная спектральная чувствительность и нелинейность дисперсионной кривой. Пример полной спектрофотометрической обработки по результатам наблюдений на БТА с ЭОП УМ-92 можно найти в [20].

С описанной аппаратурой в настоящее время наблюдения проводятся по нескольким программам: измерения лучевых скоростей систем галактик, поисковые наблюдения и обзоры галактик с УФ-континуумом, детальные исследования активных галактик. Некоторые результаты, полученные по этим программам, приведены в [20—23].

Поступила в редакцию  
14.11.79

#### Список литературы

1. Бутслев М. М., Завойский Е. К., Калиняк А. А., Никонев В. Б., Прокофьева В. В., Смолкин Г. Е. О применении многокаскадных электронооптических усилителей света в астрофизике. — ДАН СССР, 1958, 121, № 5, с. 815—818.
2. Боярчук А. А., Гершберг Р. Е., Лиморенко К. Я., Монин Г. А., Чуваев К. К. Спектрограф для изучения нестационарных объектов. — Изв. КрАО, 1966, 36, с. 277—280.
3. Денисюк Э. К., Липовецкий В. А. Спектральные наблюдения галактик Маркаряна. — Астрофизика, 1974, 10, вып. 3, с. 315—325.



4. Гутке Д. Камера Кассегрена-Шмидта «110/150» для использования ЭОП на универсальном дифракционном астроспектрографе. — Иенское обозрение, 1977, № 2, с. 99—101.
5. Гутке Д. Универсальный астрономический дифракционный спектрограф типа UAGS н/п «Карл Цейсс ЙЕНА». — Иенское обозрение, 1969, ярмарочный выпуск, с. 101—103.
6. Бутслов М. М., Завойский Е. К., Фанченко С. Д. Исследование световых сигналов предельно малой интенсивности и длительности с помощью ЭОП. — Науч. труды ВНИИОФИ, 1972, сер. В, вып. 1, с. 67—85.
7. Муратов В. Р., Нилов Е. В. — Успехи научной фотографии, 1964, 10, с. 156.
8. Волосов Д. С. Фотографическая оптика. М., 1978.
9. Фанченко С. Д., Фролов В. Л. О реальной чувствительности многокаскадных ЭОП. — Приборы и техника эксперимента, 1970, № 2, с. 210—212.
10. Афанасьев В. Л., Пимонов А. А. Потери разрешающей способности электронно-оптических преобразователей с электромагнитной фокусировкой при длительных экспозициях. — Приборы и техника эксперимента, 1980 (в печати).
11. Rose A. — Adv. Elektron. and Elektron Phys., 1948, 1, p. 131.
12. Демидов Б. А., Смолкин Г. Е., Сотников В. М., Софиев Г. Н., Фанченко С. Д. Спектр собственных шумов и дисперсия коэффициента усиления многокаскадных электронно-оптических преобразователей. — Приборы и техника эксперимента, 1965, № 3, с. 177—182.
13. Афанасьев В. Л. Редукция масштабных искажений ЭОП с магнитной фокусировкой. — Изв. САО, 1979, 11, с. 51—55.
14. Landolt A. U. A new short-period blue variable. — Ap. J., 1968, 153, p. 151—164.
15. Simkin S. M. Distortion of Galaxy radial velocity measurements by the night sky spectrum: absorption line measurements for 5000—9000 km·s<sup>-1</sup>. — Astron. and Astroph., 1977, 55, 3, p. 369—374.
16. Lane M. C., Garrison R. F. The night-sky spectrum of the city of Toronto. — J. Roy Astron. Soc. Can., 1978, 72, N 4, p. 198—205.
17. Bass A. M., Garvin D. — J. Molec. Spectrosc., 1962, 9, p. 114.
18. Атлас спектра излучения ночного неба  $\lambda\lambda$  3300—12400 Å. М., Ин-т физики атмосферы АН СССР, 1962.
19. Щербановский А. Л., Афанасьев В. Л. Экспрессная обработка спектрограмм внегалактических объектов. I. Предварительная обработка. — Сообщ. САО, 1976, 16, с. 25—34.
20. Афанасьев В. Л., Липовецкий В. Л., Шаповалова А. И. Спектрофотометрия сейфертовской галактики Mr 744. — Астрофизика, 1980, 15, вып. 4.
21. Afanasjev V. L., Karatchentsev I. D., Lipovetsky V. A., Lorenz H., Stoll D. The spectra of three newly discovered high-redshift quasars. — Astron. Nachr., 1979, 300, p. 31—36.
22. Афанасьев В. Л., Денисюк Э. К., Липовецкий В. А. 24 объекта сейфертовского типа из VIII—XI списков галактик Маркаряна. — Письма в АЖ, 1979, 5, № 6, с. 271—274.
23. Karatchentsev I. D. — Ap. J. Supp. Ser., 1980 (in press).
24. Шаповалова А. И., Щербановский А. Л. Экспрессная обработка спектрограмм внегалактических объектов. II. — Сообщ. САО, 1978, 22, с. 49—60.